

模拟电路基础

北京市中专电类课教学研究会教材编委会 编

机械工业出版社

模 拟 电 路 基 础

北京市中专电类课教学研究会教材编委会编

徐 捷 主 编



机 械 工 业 出 版 社

本书专门介绍中等职业教育计算机专业所需的模拟电路基础知识, 主要内容包
括半导体器件、放大电路基础、负反馈、线性集成电路及应用、振荡电
路、低频功率放大电路、直流稳压电源等。

图书在版编目 (CIP) 数据

模拟电路基础/徐捷主编. —北京: 机械工业出版社,

1998. 2

ISBN 7-111-04435-5

I. 模… II. 徐… III. 模拟电路-专业学校-教材 IV. T

N710

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 01686 号

出 版 人: 马九荣 (北京市百万庄南街 1 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 李振标 版式设计: 宋莉静 责任校对: 姚培新

封面设计: 方 芬 责任印制: 侯新民

机械工业出版社京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

1998 年 2 月第 1 版·1998 年 2 月第 1 次印刷

787mm×1092mm $1/16$ ·12 $1/2$ 印张 304 千字

0 001--5 000 册

定价: 18.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

北京市中专电类课教学研究会教材编委会

主任委员：姜 邈

副主任委员：阎英维 许经鸾

秘 书 长：刘连青

副 秘 书 长：蒋湘若

委 员：徐 捷 张树培 张汉英 周以洁

刘小鹤 尹宏业 邹长庚

前 言

《电路基础》、《模拟电路基础》、《数字电路基础》是计算机及应用专业必修的技术基础课程。按照中等职业教育的培养目标,遵循理论教学必须够用的原则,北京市中专电类课教学研究会教材编委会组织编写了这套系列教材,供各中专学校计算机专业及相近专业使用。

《模拟电路基础》课的任务是使学生掌握必须具备的模拟电路的基本概念、电路及其分析计算的基本方法,为学习其它电子技术课程及计算机硬件打下基础。本书的主要内容:半导体器件、基本放大电路、负反馈应用基础、场效应管放大电路、功率放大电路、正弦波振荡电路、晶体管直流稳压电源、线性集成电路及其应用等。

编写本书的指导思想:

1. 在适当照顾学科体系的同时,对模拟电路教材的内容,本着少而精的原则做了适当的精简和压缩。本书所介绍的知识避免求全,而以“够用”为度;
2. 适当降低模拟电路的理论深度,尽可能避免繁琐的数学分析,努力加强物理概念的阐明。力求做到深入浅出、通俗易懂、文笔流畅,便于阅读;
3. 在内容上,注重知识的内在联系和相互之间的逻辑关系,建立较为新颖的知识系统,有利于学生掌握知识的整体性。
4. 在处理分立与集成电路的关系方面,本书以集成为主,贯彻“分立”为“集成”服务的原则。重点介绍通用型和专用型集成电路的原理、特性及应用,但分立元件电路中的基本概念、原理和分析方法是正确理解集成电路原理和应用必不可少的基础。本书对分立元件电路的介绍本着删繁就简,与集成电路有机结合的原则进行安排,从而体现“分立”为“集成”服务的思路。

参加本书编写的人员有:北京市电子工业学校赵便华、北京铁路电气化学校赵敏、北京钢铁学校孙厚坦、北京市第二轻工业学校姚毅军、化工部化校欧阳若规、北京市仪器仪表工业学校汪世明、北京市计算机工业学校谢兴宝、北京市化工学校刘文娟、北京煤炭工业学校王艳红、北京市建筑材料工业学校刘振强。本书由北京市电子工业学校徐捷主编,北京无线电工业学校姜邈主审。

在有关学校的大力支持下,北京市中专电类课研究会全面组织、具体协助,使本书较好地完成了编写和审校工作,得以出版发行。全体参编人员对有关学校、电类课研究会的领导表示感谢。

限于编者的水平,本书难免有不足之处,欢迎各兄弟学校和广大读者批评指正。

编者

1997年12月

目 录

前言

第 1 章 半导体器件	1	2 功放电路中的功率平衡关系 和效率	101
1 半导体的基本知识	1	3 变压器耦合功放电路	103
2 半导体二极管	6	4 无输出变压器的功放电路	110
3 半导体三极管	9	5 功率管的散热问题	115
4 场效应管	17	本章小结	115
本章小结	24	思考题与习题	116
思考题与习题	25	第 6 章 正弦波振荡电路	119
第 2 章 基本放大电路	29	1 反馈式正弦波振荡器的基本 工作原理	119
1 概述	29	2 RC 正弦波振荡器	121
2 放大电路的组成和基本工作原理	33	3 LC 正弦波振荡器	125
3 基本放大电路分析	38	4 晶体振荡器	131
4 放大电路的一般分析方法	42	本章小结	134
5 差动放大电路	47	思考题与习题	134
6 多级放大电路的组成和计算原则	54	第 7 章 晶体管直流稳压电源	139
7 放大电路的频率响应	59	1 整流与滤波	139
本章小结	62	2 硅稳压管稳压电路	146
思考题与习题	63	3 串联型稳压电路	148
第 3 章 负反馈应用基础	70	本章小结	153
1 反馈的基本概念	70	思考题与习题	153
2 四种组态的负反馈放大器	74	第 8 章 线性集成电路及其应用	158
3 负反馈对放大器性能的影响	79	1 集成运算放大器的基本结构	158
本章小结	85	2 集成运放电路例—5G28	165
思考题与习题	85	3 集成运放的基本特性和参数	168
第 4 章 场效应管放大电路	89	4 集成运放构成的基本负反馈电路	172
1 场效应管放大电路的偏置电路	89	5 集成运放构成的基本正反馈电路	177
2 场效应管放大电路的动态分析方法	90	6 集成功率放大器	179
3 使用有源负载的场效应管放大电路	94	7 方波和三角波发生器	182
本章小结	96	8 集成稳压电源	184
思考题与习题	96	本章小结	188
第 5 章 功率放大电路	100	思考题与习题	189
1 功率放大电路的特点和要求	100		

第 1 章 半导体器件

1 半导体的基本知识

无论是制造单个的半导体器件，还是制造大规模集成电路，都要用到半导体材料。因此，在介绍半导体器件之前，首先要对半导体的基本性质有一定的了解，这将有助于对半导体器件外部特性的理解。

1.1 本征半导体

半导体的导电能力介于导体和绝缘体之间。在自然界中，属于半导体的材料很多，而用来制造半导体器件的材料主要是硅 (Si)、锗 (Ge) 和砷化镓 (GaAs) 等。硅和锗都是四价元素，其中以硅用得最广泛，在以后的讨论中，主要以硅为例进行讲解。

作为半导体器件的材料，必须首先经过高纯度 (99.9999%) 的提炼，这种不含杂质的半导体，称为本征半导体。纯净的硅单晶称为本征硅。为了了解半导体的导电性能，需要从其原子结构讲起。本征硅的原子结构如图 1-1a 所示。其最外层轨道上有 4 个电子，它受原子核的束缚力最小，称为价电子，元素的化学性质是由这些价电子决定的，其导电性能也与价电子有关。为了便于讨论，常采用图 1-1b 所示的简化模型。图中 $\odot$ 代表原子核和除价电子外的内层电子所组成的惯性核的电荷。

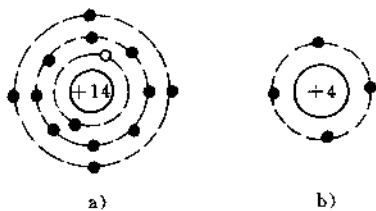


图 1-1 硅 (Si) 原子结构模型

a) 原子结构图 b) 简化模型

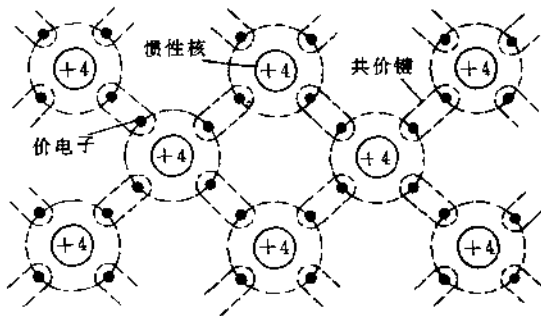


图 1-2 硅的共价键结构示意图

硅制成单晶后，它的原子都按一定的规律整齐地排列着，原子之间靠得很近，价电子不仅受到自身原子核的吸引，而且还受到相邻原子核的作用，使价电子为两个相邻原子所共有，形成了晶体中的共价键结构，其示意图如图 1-2 所示。每个原子都有 4 个价电子，通过共价键结构与相邻 4 个原子结合在一起，形成排列整齐的晶体。

在热力学温度零度 (-273.15°C) 和无外界能量激发的条件下，由于价电子被共价键束缚着，不存在自由运动的电子，此时半导体呈现绝缘体的特性。但在常温下或受到光照时，某些共价键中的价电子从外界获得足够的能量，挣脱共价键的束缚而成为自由电子。同时，在共价键中留下了空位，常称为空穴。这种现象称为本征激发。自由电子和空穴总是成对地出

现，常称之为电子空穴对。

当共价键出现了空穴后，邻近共价键中的价电子有可能来到这个新的空位。这种过程的持续进行，就相当于一个空穴在晶体中移动，如图 1-3 所示。原子本来是电中性的，自由电子携带负电荷离开后，空穴可看成是携带正电荷的载流子。因此，本征半导体中，有自由电子和空穴两种载流子参与导电。但是，在本征激发的同时，半导体中还存在着自由电子受原子核吸引，而重新回到共价键的机会，从而使部分电子空穴对消失，这种现象称为复合。在一定温度下，电子空穴对的产生和复合是同时进行的，达到动态平衡时，电子空穴对便维持一定的浓度值。但由于本征激发所产生的电子空穴对的浓度值很低，因此，本征硅的导电能力很弱，然而却与温度有着十分密切的关系。温度对本征半导体的导电性能有较大的影响。

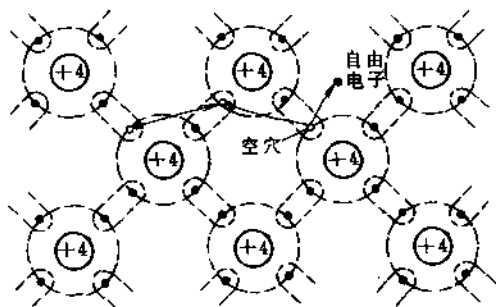


图 1-3 空穴在晶格中的移动

1.2 杂质半导体

在本征半导体中，掺入某些微量的元素作为杂质，可使其导电性能发生显著的变化。掺入杂质的半导体，称为杂质半导体。按所掺杂质的不同，可分为 N 型半导体和 P 型半导体。

1. N 型半导体 如果在本征半导体中，采用扩散等工艺，掺入微量的磷、砷或锑等五价元素（例如磷）则在原来的硅晶体结构中，磷原子就会取代某些硅原子的位置。磷原子有五个价电子，其中 4 个价电子与周围的 4 个硅原子的价电子组成共价键，而多余的 1 个价电子处于共价键以外，它在室温下很容易激发成自由电子。失去一个价电子的磷原子就成为带一个电子电荷的正离子，如图 1-4 所示。由于杂质原子可以提供自由电子，故称施主原子。尽管所掺入的元素含量极微，但在室温下，每个磷原子所提供的多余价电子都可成为自由电子，且它在数量上已远远超过本征激发下出现的电子空穴对数目，所以这是一种以电子导电为主的半导体，称为 N 型半导体。这里的自由电子为多数载流子（简称多子），空穴为少数载流子（简称少子）。

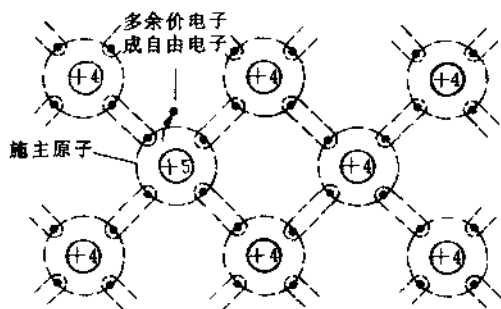


图 1-4 N 型半导体结构示意图

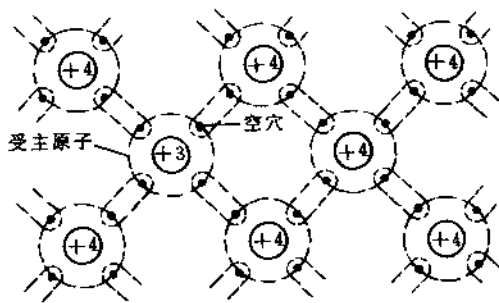


图 1-5 P 型半导体结构示意图

2. P 型半导体 如果在本征硅中, 掺入微量的硼、镓或铟等三价元素 (例如硼), 硼原子的 3 个价电子与周围的 4 个硅原子组成共价键时, 还缺少 1 个价电子, 出现了 1 个空穴, 如图 1-5 所示。鉴于同 N 型半导体相类似的原因, 这种掺杂半导体是一种以空穴导电为主的半导体, 称为 P 型半导体。这里, 空穴为多子, 电子为少子。在室温下, 这种空穴很易接收邻近共价键中的价电子, 而使杂质原子成为带 1 个电子电荷的负离子, 故硼原子称为受主原子。

由以上分析可知, 掺杂半导体中的多子浓度主要取决于杂质的含量; 而少子的浓度则与本征激发和复合机会有关, 它的大小与温度有十分密切的关系。

1.3 半导体中的电流

如所周知, 电流是载流子定向运动的结果。半导体中的载流子有两种运动形成。一是载流子在电场 E 作用下的定向运动, 如图 1-6 所示, 空穴沿着电场方向运动, 而电子逆电场方向运动。由于两种载流子所带电荷极性相反, 所以两种载流子运动所产生的电流方向一致。载流子在电场作用下的这种运动, 我们称之为漂移运动。

载流子的另一种运动形式是扩散运动。所谓扩散运动, 是指载流子由浓度高的区域向浓度低的区域运动。当半导体的一个端面受到光照或者载流子从外界注入时, 半导体中载流子浓度的热平衡状态就受到破坏, 出现非平衡的自由电子或空穴, 并在半导体内部形成浓度差, 如图 1-7 所示, 这时将出现扩散电流。

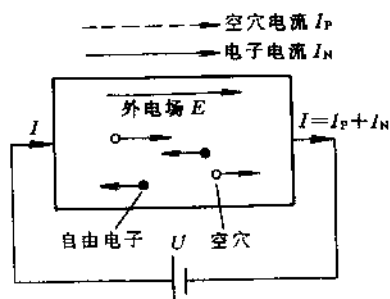


图 1-6 电场作用下载流子的漂移运动

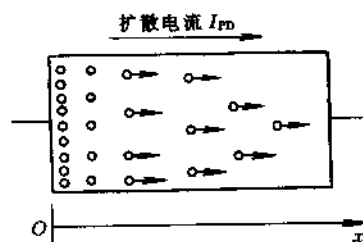


图 1-7 非平衡载流子 (空穴) 的扩散运动

1.4 PN 结及其单向导电性

1. PN 结的形成 如果在 N 型半导体的基片上, 采用平面扩散法等工艺, 掺入三价元素作为补偿杂质, 使之形成 P 型区。同理, 在 P 型半导体基片上掺入五价元素使之形成 N 型区。则在 P 区和 N 区之间的交界面附近, 将形成一个很薄的空间电荷层, 称为 PN 结, 如图 1-8a 所示。为说明方便起见, 将 PN 结附近的区域扩展为 1-8b 的形式。

PN 结的形成过程可以解释如下。首先, 由于 P 型和 N 型半导体之间存在着多子浓度的差异, 即空穴在 P 区内是多子, 在 N 区内则是少子; 自由电子在 N 区内是多子, 在 P 区内则是少子。因此, P 区内的空穴就要向 N 区扩散。结果, 交界面附近的 P 区一侧因失去空穴而留下不能移动的正离子; 同样, N 区内的电子将向 P 区扩散, N 区一侧因失去电子而留下不能移动的正离子。扩散到对方的载流子便成为异型半导体中的少子面与该区内的多子相复合。

这样，在两种半导体的交界面两边就形成了电荷量相等的，由正、负离子电荷所组成的空间电荷区，如图 1-8c 所示。由于在交界面的 P 区一侧呈现出负电荷，N 区一侧呈现正电荷，所以出现了方向由 N 区指向 P 区的内电场 E ，从而形成了如图 1-8d 所示的电位分布曲线。 V_0 是 PN 结上的内电场的电位差。

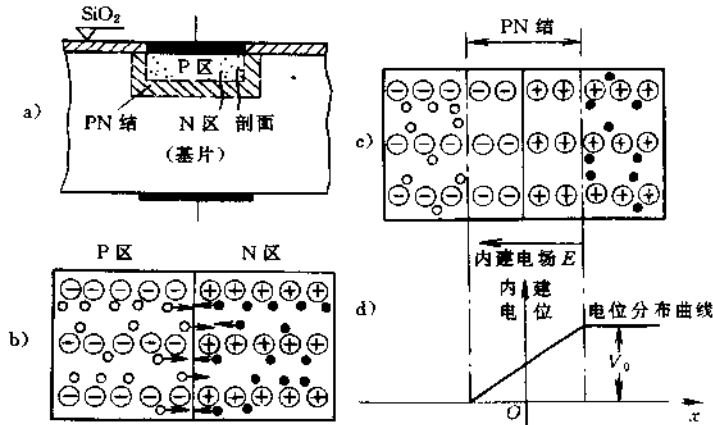


图 1-8 PN 结的形成

a) 用平面扩散法掺杂 b) 扩展后的 P 区和 N 区交界面 c) PN 结的形成 d) 结区电位分布曲线

内电场是由多子的扩散运动引起的，它将带来两种后果：一是内电场将阻碍多子的继续扩散；二是内电场促使少子一旦靠近 PN 结将漂移到对方区域，其作用恰好与多子扩散运动相反，从而使空间电荷区缩小。

由此可见，扩散与漂移这一对矛盾只有达到动态平衡时，空间电荷区的宽度和内电场的电位差才能相对稳定。此时，有多少个多子扩散到对方，便必定有多少个少子从对方漂移回来。由于二者所产生的电流方向相反（如图 1-9 所示），因而在动态平衡时，流过 PN 结的净电流为零。如无外加电场的作用或其它因素的激发即使把 PN 结短路，也仍然没有电流流向外电路。

为强调 PN 结的某种特性，有时称它为“空间电荷区”，有时称它为“阻挡层”（以强调对多子扩散运动的阻挡作用）或“势垒区”，也称之为“耗尽层”（以强调该区内载流子的浓度减到很小以至耗尽的特点）。如果从“电阻”的概念讨论，则由于 PN 结以外的 P 区和 N 区内仍然保持着原有的平衡载流子浓度，PN 结内的载流子已被耗尽，而常把 PN 结看作高阻区，PN 结以外的部分看成低阻区。

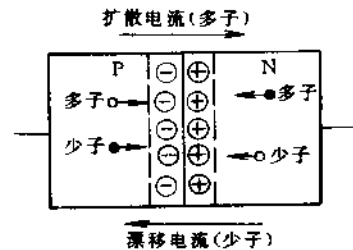


图 1-9 扩散电流和漂移电流的方向

2. PN 结的单向导电性 以上讨论了 PN 结无外加电压时的情况，着重说明了 PN 结的形成过程和动态平衡的概念。现在，让我们考察 PN 结在外加电压作用下的特性。

(1) 外加正向电压（也称正向偏置，简称正偏） 如果外加电压的极性使 P 区一侧接电源的正极，N 区一侧接电源的负极，如图 1-10a 所示，即外加电场与 PN 结内电场方向相反。在此情况下，N 区中的多子（电子）和 P 区中的多子（空穴）将向 PN 结移动，如图 1-10b 所示。当 N 区内的电子进入正空间电荷层后，就要和部分正离子中和，使区内的正空间电荷层

的厚度和空间电荷量减小。同样，P 型半导体的多子空穴进入负空间电荷层后中和了部分负离子，使 P 区内的负空间电荷层的厚度和空间电荷量减小。其结果是 PN 结总的宽度变窄，其上的内电场电位差减小，如图 1-10d 中实线所示，这将有利于多子的扩散。于是，在外加电压增加到一定值以后，扩散电流大大的增加了。此时，外加正向电压只要有微小的变化，便能使扩散电流发生显著的变化。

至于漂移电流，由于少子的数量只与温度有关，而与外加电压无关，因此在正向电压作用下，漂移电流的数值远小于扩散电流。可见，越过 PN 结的电流近似为扩散电流，称为正向电流，其大小受外电路限流电阻 R 的限制。

(2) 外加反向电压（也称反向偏置，简称反偏） 当外加电压的极性反向，使 P 区一侧为负 N 区一侧为正时，如图 1-11a 所示，外加电场与内电场方向一致。此时，多子将离开 PN 结而使空间电荷区变宽其上的电位差增高，如图 1-11b、c、d 所示，因此，扩散电流大大减弱，少子的漂移电流占优势，通过 PN 结的电流主要是由漂移电流决定，外电路电流方向将与正向电流相反，称为反向电流。我们知道，少子是由本征激发引起，其浓度很低，因此，反向电流远小于正向电流。当温度一定时，少子浓度一定，因此反向电流几乎不随外加电压而变化，故也称反向饱和电流。

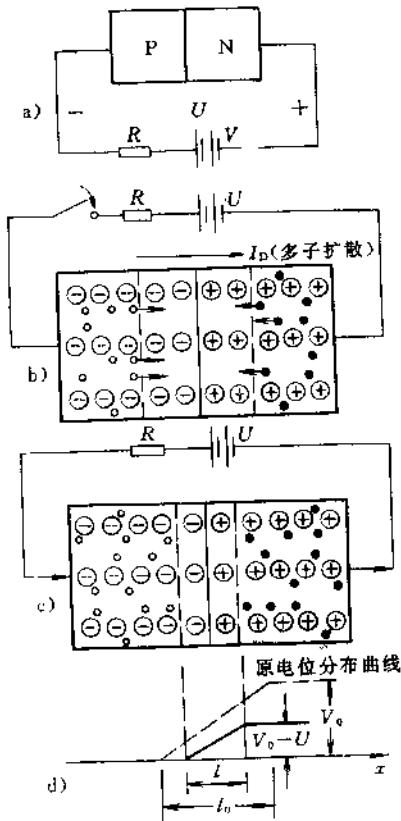


图 1-10 PN 结外加正向电压时的情况
a) PN 结外加正向偏置 b) 多子向结区运动
c) 结区减薄 d) 结区电位分布曲线的变化

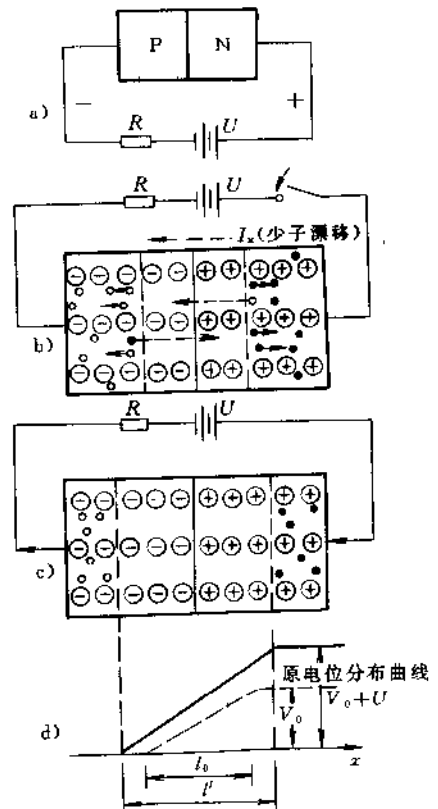


图 1-11 PN 结外加反向电压时的情况
a) PN 结外加反向偏置 b) 多子离开结区
c) 结区增厚 d) 结区电位分布曲线的变化

由此可见,PN 结具有单向导电性,外加正向偏置时所产生的正向电流可远大于外加反向偏置时的反向饱和电流。这一特性正是整流二极管工作机理的基础。

3. PN 结的电容效应 在耗尽层中,两种半导体界面的两侧贮存了极性不同的空间电荷,而且在外加电压变化时,空间电荷量也随着变化,这就相当于一个电容,称之为结电容,由于这个电容是由势垒区宽度随外加电压变化而引起的,所以称势垒电容,用 C_T 表示。由于耗尽层中存贮的空间电荷量并不与外加电压成正比,所以结电容是非线性电容。

在扩散运动中的载流子,在它所经过的空间中也产生了空间电荷,或者说是空间存贮的动态电荷。这也产生了电容效应,称之为扩散电容,用 C_D 表示,它也是非线性电容。在 PN 结反向偏置时,因没有载流子的扩散运动,故没有扩散电容。在正向偏置时,扩散电容比较显著。如果用 C_j 表示 PN 结结电容,则在正偏情况下 $C_j \approx C_D$; 反偏情况下 $C_j \approx C_T$ 。

当工作频率较高(例如几十千赫以上)时,结电容的影响是不能忽视的,而在工作频率较低时,一般不考虑 PN 结的电容效应。

2 半导体二极管

2.1 半导体二极管的结构和类型

一个 PN 结加上相应的电极引线和管壳,就是一个二极管。在电路中,我们用图 1-12a 所示的符号表示二极管。图中的箭头由管子的正极(P 区)指向负极(N 区),它指出了正向电流的方向。

根据不同的制造工艺,二极管通常有以下三种类型:

1. 点接触型二极管 其结构如图 1-12b 所示。它的特点是 PN 结面积小,相应的结电容也小,适用于小电流的整流和作高频检波、混频用。

2. 面接触型二极管 其结构如图 1-12c 所示。它的特点是结面积大,工作电流大,频率低,适用于作整流管。

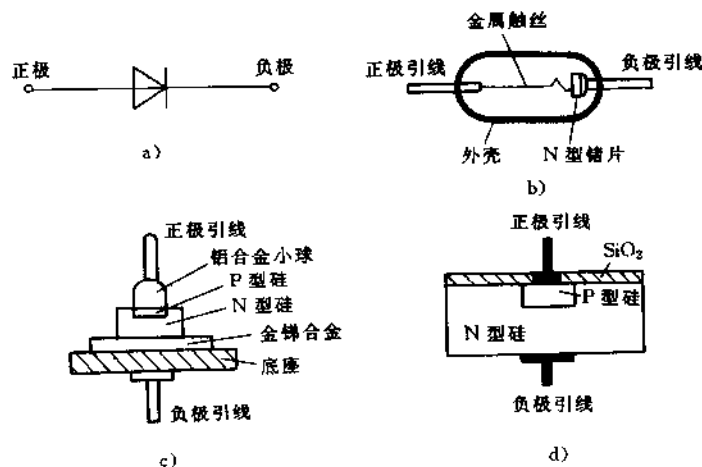


图 1-12 半导体二极管的符号和结构

a) 二极管的电路符号 b) 点接触型二极管 c) 面接触型二极管 d) 平面型二极管

3. 平面型硅二极管 其结构如图 1-12d 所示。它的结面积大时, 可作大功率整流; 结面积小时, 结电容也小, 适用于脉冲数字电路中作开关管。

制造二极管的材料有硅和锗, 分别称为硅二极管和锗二极管。

2.2 二极管的伏安特性

如前所述, 二极管就是一个 PN 结, 其伏安特性曲线如图 1-13 所示。图中 U 为二极管正极相对于负极的电压, I 为二极管的电流。

根据理论分析, PN 结的理想伏安特性可用下式表示:

$$I = I_s (e^{U/U_T} - 1), \quad (1-1)$$

式中

$$U_T = \frac{kT}{q}, \quad (1-2)$$

式中, T 为绝对温度; k 为波尔兹曼常数, $k = 1.381 \times 10^{-23} \text{J/K}$; q 为正电子的电量 ($q = 1.6 \times 10^{-19} \text{C}$), U_T 叫做温度等效电压, 在常温下 (300K)

$$U_T = \frac{300}{11600} \text{V} \approx 26 \text{mV}$$

式 (1-1) 是假定没有击穿的情况下得到的, 因而不能说明 $U \geq U_{BR}$ 之情况。

在 $U < 0$, 且 $|U| \gg U_T$ 时, 按式 (1-1) 有

$$I \approx -I_s \quad (1-3)$$

此式说明 I_s 是反向饱和电流的绝对值, 通常所说的反向饱和电流也是指绝对值而言。在 $U \gg U_T$ 时, 有

$$I \approx I_s e^{U/U_T} \quad (1-4)$$

式 (1-1) 与锗二极管的特性曲线大致相符, 与硅二极管的特性曲线则有较大的差别。尽管如此, 式 (1-1) 仍能定性说明实际二极管的一些特性。

锗二极管的 I_s 常为 μA 量级; 硅二极管的 I_s 常为 nA 量级。由于 I_s 都很小, 在正向偏置下只有 U/U_T 大到一定数值后, 正向电流才明显地迅速增大。硅二极管因 I_s 更小, 与锗二极管比较, 只有在更大的正向电压时, 正向电流才明显地表现出来。实际二极管的正向伏安特性曲线在 I 较大时并不严格地符合式 (1-4) 表示的指数曲线, 而有些近似于直线。若以直线近似表示这部分特性曲线, 如图 1-14, 此直线的横截距为 U_{on} , 只有在 $U > U_{on}$ 时 I 才较大; 在

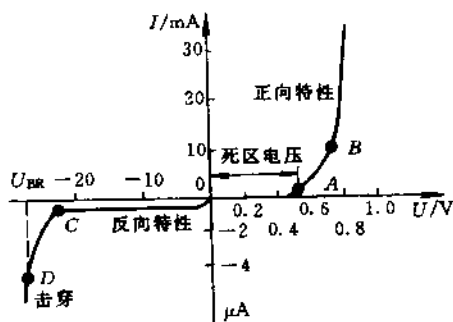


图 1-13 硅二极管的典型伏安特性

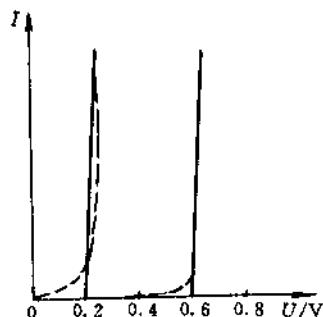


图 1-14 用折线近似正向特性

$U < U_{on}$ 时, 二极管无正向电流。按照这种说法, 截距 U_{on} 是二极管正向导通的阈值电压, 简称导通电压。硅二极管的 U_{on} 约为 $0.4 \sim 0.6V$; 锗二极管的 U_{on} 约为 $0.1 \sim 0.2V$ 。

在 $0 < U < U_{on}$ 时, 因 I 很小, 常被认为二极管没有导通, 这一区域常被称为二极管的“死区”。这实际上认为在 $0 \leq U \leq U_{on}$ 时, 二极管的伏安特性曲线与横轴重合。这种近似对硅二极管常是很适用的; 对锗二极管在 I 较小时则有较大的误差。

二极管的反向电流主要是少数载流子的漂移电流。在二极管的温度升高时, 少数载流子的浓度随之增加, 因而 I_s 也随之增大。 I_s 增大的结果不仅使反向电流增大, 同时也增大了正向电流, 并使 U_{on} 减小。

2.3 二极管的主要参数

在使用二极管时, 一般应注意下列主要参数:

(1) 最大整流电流 I_F 它是二极管长期运行时允许通过的最大半波整流电流平均值, 由 PN 结的面积和散热条件所决定。整流电流超过此值时, 二极管将被烧坏。

(2) 反向击穿电压 U_{BR} 当管子的反向电压达到反向击穿电压 U_{BR} 时, 反向电流剧增, 二极管的单向导电性能被破坏, 甚至引起二极管损坏。通常将此反向工作电压的一半作为二极管所允许的最高反向工作电压 U_{RM} , 以保证管子安全工作。

(3) 反向电流 I_R 是指在室温下, 加上最高反向工作电压 (或其它规定的反向电压) 时的反向电流。反向电流越小, 管子的单向导电性越好。随温度增加, 反向电流呈指数规律增加, 在高温运行时, 要特别注意。

此外, 二极管还有最高工作频率和结电容等参数。一般生产厂家将二极管的参数汇编成手册, 供用户选用。

2.4 稳压二极管

除了利用 PN 结的特性可以制成上述普通二极管外, 还可以制成其它特种二极管, 如变容二极管、光电二极管及稳压管等。这里将介绍电子线路中常用的稳压二极管。

利用 PN 结的反向击穿特性可以制成稳压二极管, 其电路符号如图 1-15a 所示。图 1-15b 为硅稳压管的伏安特性曲线。由图可见, 当反向电压超过击穿电压时, 反向电流急剧增大, 但 PN 结两端的电压几乎不变, 近似于恒压源特性。利用这个特性, 在不同工艺条件下, 可以制成具有不同稳定电压值的稳压管, 并要求击穿特性尽可能陡峭。

稳压管的主要参数有:

(1) 稳定电压 U_z 当通过稳压管的电流为规定的测试电流 I_z 时, 相应的稳压管两端的电压值为稳定电

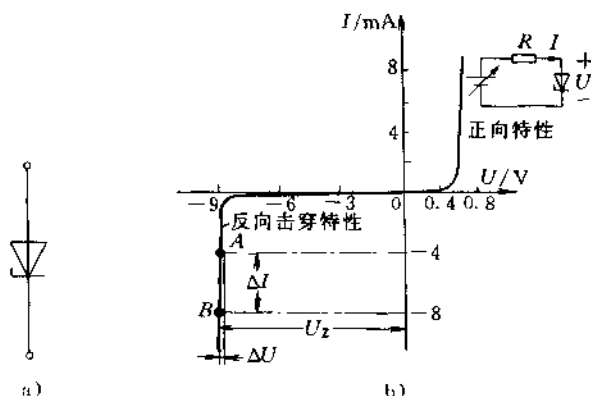


图 1-15 硅稳压二极管的符号和伏安特性

a) 电路符号 b) 伏安特性

压 U_z ，如图 1-15b 所示。由于工艺方面的原因，同一型号的稳压管的稳定电压可允许有一定的范围，如 2CW14 型稳压管在 $I_z=10\text{mA}$ 时， U_z 的允许值在 6~7.5V 之间。

(2) 动态电阻 r_z 在图 1-15b 的反向击穿特性曲线的稳压区内，如果取一个不大的 I_z 的变化 ΔI_z ，可以得到 U_z 的相应变化 ΔU_z ，于是

$$r_z = \Delta U_z / \Delta I_z \quad (1-5)$$

r_z 称为稳压二极管的动态电阻，它是反向击穿特性曲线中切线 AB 斜率的倒数。 r_z 越小，说明反向击穿特性愈陡，稳压特性越好。 r_z 的数值通常为几欧~几十欧，且随着 I_z 的增大，该值减小。在各种稳压管中，以稳定电压为 7V 左右的稳压管动态电阻最小。

(3) 稳定电压的温度系数 该参数是说明稳压管稳定电压值受温度变化影响的参数。例如 2CW2D 的电压温度系数是 $+0.95 \times 10^{-3}/^\circ\text{C}$ ，就是说温度每增加 1°C ，它的稳压值将升高 0.095%。如在 20°C 时的稳压值是 17V，则在 50°C 时的稳压值将是

$$17\text{V} + \frac{9.5}{10000} \times (50 - 20) \times 17\text{V} = 17.48\text{V}$$

一般来说，低于 6V 的稳压管，它的电压温度系数是负的，高于 6V 的稳压管，它的电压温度系数是正的，而在 6V 左右的管子，其稳压值受温度的影响比较小。因此在要求稳定度比较高的情况下，一般常选 6V 左右的稳压管。

(4) 最大稳定电流 I_{zM} 和最大功耗 P_{zM} 当稳压管反向工作时，PN 结上的功率损耗

$$P_z = U_z I_z$$

显然， P_z 将转化为 PN 结的温升。当稳压管的结温超出允许值时，稳压管将不能正常工作，以致烧坏。为此，手册中常对稳压管的最大允许功率 P_{zM} 做出规定。因 $P_{zM} = I_{zM} U_z$ ，由此即可确定最大稳定电流 I_{zM} 的大小。

3 半导体三极管

半导体三极管又称为双极型晶体管，简称为晶体管或三极管，简称为 BJT。它的基本组成部分是两个靠得很近且背靠背排列的 PN 结。由于这两个 PN 结之间的互相影响，使晶体管表现出不同于单个 PN 结的特性而且具有电流放大功能，从而使 PN 结的应用发生了质的飞跃。

3.1 晶体管的结构与类型

晶体管由两个 PN 结组成，在图 1-16a 中，晶体管的两个 PN 结有公共的 P 区，这类晶体管叫做 NPN 型管。在图 1-16b 中，晶体管的两个 PN 结有公共的 N 区，叫做 PNP 管。这两图所示的中间区域叫基区，基区的引线叫基极 (b)；两侧的区域分别叫发射区和集电区，相应的引线叫发射极 (e) 和集电极 (c)。基区与发射区之间的 PN 结叫发射结，集电区与基区之间的 PN 结叫集电结。上述两种类型的晶体管在电路图中分别用图 1-16c、d 两种符号表示。两种符号的差别仅在于发射极上箭头的指向不同，箭头表示发射结正向导电时的电流方向。应当指出的是，虽然发射区和集电区同为 N 型（或 P 型）半导体，但发射区的掺杂浓度远大于集电区的掺杂浓度。

制造晶体管的材料有硅和锗两种，分别称为硅管和锗管。它们又可分别构成 NPN 和 PNP 两种类型的晶体管。就我国目前生产情况看，硅管多为 NPN 型，锗管多为 PNP 型。

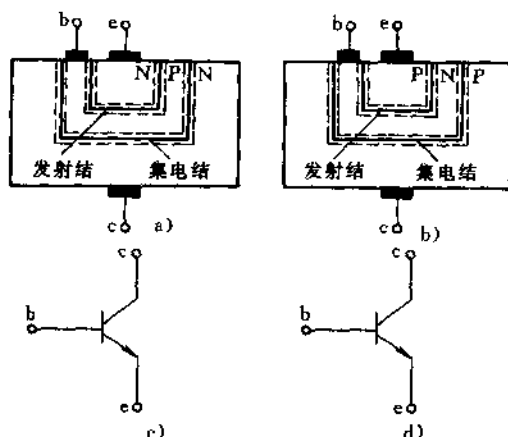


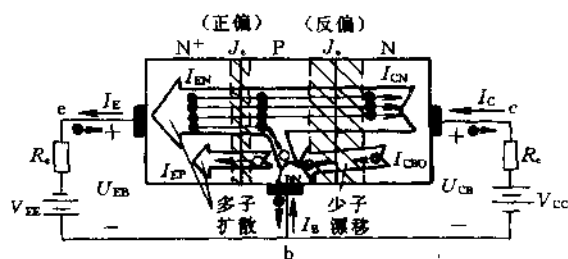
图 1-16 晶体管结构示意图及其符号

3.2 晶体管中的电流分配与控制

晶体管在工作时，当集电结和发射结加上不同的偏置电压时，可以有放大、截止、饱和和倒置四种工作状态。在模拟电子线路中，通常是利用晶体管的放大状态；在脉冲与数字电路中，主要是利用晶体管的截止和饱和状态；而在某些特殊的情况下，也要用到晶体管的倒置工作状态。本节主要讨论放大状态下，晶体管中的电流分配情况和电流控制作用。

1. 晶体管内部载流子的运动

在图 1-17 所示电路中，设晶体管为 NPN 管。电源 V_{EE} 使发射结处于正向偏置 ($U_{BE} > 0$)，而电源 V_{CC} 使集电结处于反向偏置 ($U_{CB} > 0$)。因此，发射结的宽度变窄，集电结的宽度增大。这时，发射区便有大量的电子扩散到基区，形成了发射极电流 I_{EN} (N 型区电子扩散时，电源 V_{EE} 便源源不断地补充其扩散掉的电子)。当然，基区的

图 1-17 NPN 型晶体管内部载流子的运动和
各电极电流分配

空穴也会扩散到发射区，但是由于在制造工艺中，总是使发射区的电子浓度比基区的空穴浓度高得多，因此，穿越阻挡层的电流主要是由发射区的电子流所形成的。

当大量电子注入基区后，一部分电子与基区的空穴“复合”，形成基极电流 I_{BN} ；另一部分电子则通过基区被“输运”到集电区的边缘。由于集电结处于反偏，因此被“输运”到集电结边缘的电子将被反向电压吸引而进入集电区，最后达到电源 V_{CC} 的正极，形成集电极电流 I_{CN} ，因此有

$$I_{EN} = I_{CN} + I_{BN} \quad (\text{且 } I_{BN} \ll I_{EN}, I_{CN})$$

如前所述，处于反偏的集电结也会有一定的反向电流，即基区和集电区本身的少数（由本征激发产生）所形成的漂移电流，称为集电极和基极间的反向饱和电流（即集电结的反向饱和电流），用 I_{CBO} 表示，它通常很小。它是集电极电流和基极电流的一部分，但对发射极电

流却没有影响。于是，可得晶体管各电极的电流

$$I_C = I_{CN} + I_{CBO} \quad (1-6)$$

$$I_B = I_{BN} - I_{CBO} \quad (1-7)$$

$$I_E = I_C + I_B \quad (1-8)$$

式(1-8)表示晶体管各电极电流的代数和为零，满足基尔霍夫电流定律。

2. 各电极电流之间的关系 在制造晶体管时，人们总是将基区做得极薄，以致电子进入基区后，往往来不及“复合”便已经达到集电区的边缘。因此，电子在基区“复合”的数目很少，一般只占从发射区扩散来的电子的百分之一、二、三，其余大部分电子被输运到集电区边缘并且被吸收到集电极，形成集电极电流。这就是说，“输运”过程是矛盾的主要方面，“复合”是次要的。集电极电流 I_C 大大超过基极电流 I_B ，而且，由于基区厚度等因素已固定，这就使得输运和复合过程的比例关系也随之固定，也即晶体管的 I_C 和 I_B 之间总维持一个固定的比例关系。

晶体管各电极之间的电流，一方面要维持式(1-8)的关系，另一方面又要维持 I_C 与 I_B 之间的一定的比例关系。这两条，就完全决定了晶体管内部的电流分配规律。

为了定量地了解晶体管的电流分配关系，我们可以按图 1-17 的电路，通过改变 V_{BE} ，测得不同的一组 I_E 、 I_B 、 I_C 值，其测得的结果列于表 1-1：

表 1-1

发射极电流 I_E /mA	1	2	3	4	5
集电极电流 I_C /mA	0.96	1.91	2.86	3.81	4.76
基极电流 I_B /mA	0.04	0.09	0.14	0.19	0.24

表中， I_C 实际上是从基区输运过来的电子电流和集电极反向饱和电流之和 ($I_C = I_{CN} + I_{CBO}$)， I_B 是复合电流与反向饱和电流之差 ($I_B = I_{BN} - I_{CBO}$)。

由表可见，若发射极电流 I_E 固定为 2mA，则集电极电流 I_C 为 1.91mA (其中输运过程形成的电流为 1.90mA，反向饱和电流为 0.01mA)，基极电流 I_B 为 0.09mA (其中复合过程形成的电流为 0.10mA，反向饱和电流为 -0.01mA)。若基极电流 I_B 固定为 0.09mA，则集电极电流 I_C 就必然是 1.91mA，发射极电流 I_E 必然为 2mA。

同样，若固定集电极电流，也会得到类似的结果。在晶体管中只要任何一个电极的电流确定了，其它两个电流将随之而确定，这是晶体管的一个重要特点。

知道了晶体管的电流分配关系，就可以理解为什么晶体管具有电流放大作用。当我们在基极加一信号电压，使基极电流 I_B 随信号的变化有一较小的变化 (如从 0.09mA 变到 0.14mA， $\Delta I_B = 0.05$ mA)，则相应的集电极电流 I_C 有一个较大的变化 (即从 1.91mA 变到 2.86mA， $\Delta I_C = 0.95$ mA)。可见， ΔI_C 比 ΔI_B 扩大了 19 倍。这说明晶体管有电流放大作用。

通常，将集电极电流与基极电流之比记为 β ：

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} \quad (1-9)$$

而将集电极电流和发射极电流之比记为 $\bar{\alpha}$ ：

$$\bar{\alpha} = \frac{I_C}{I_E} \quad (1-10)$$